

01;04

Расчетное определение вероятности поражения молнией наземных объектов

© М.М. Резинкина, В.В. Князев, В.И. Кравченко

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт „Молния“
Национального технического университета „Харьковский политехнический институт“,
61013 Харьков, Украина
e-mail: marinar@kpi.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 5 мая 2006 г.)

На основе предложенной авторами статистической модели, описывающей процессы продвижения лидерного канала молнии к земле и ориентировки его на заземленные объекты, разработана методика расчета распределений вероятности поражения молнией защищаемых объектов и молниеотвода. Приведены примеры расчета вероятности поражения молниями, несущими к земле различные значения потенциала, отдельных зон защищаемой области.

PACS: 92.60.Pw

Введение

Нормативные документы (см., например, [1,2]) предусматривают необходимость определения вероятности поражения объектов молнией. В настоящее время существует методика оценки риска поражения молнией объекта в целом [2]. При этом зона его возможного поражения характеризуется радиусом L и оценивается исходя из условия, что L в 3 раза превышает высоту объекта h_0 . Такой подход не учитывает возможность прорыва на объект молний, лидеры которых несут к земле большие потенциалы U_i , близкие к предельным значениям, когда прорыв молнии может произойти с расстояния, большего, чем $3h_0$ (например, при $U_i \sim 200$ MV для $h_0 \sim 10$ m L составляет порядка 60 m, т.е. в 2 раза превышает $3h_0$).

Вследствие трудностей, с которыми приходится сталкиваться при определении вероятности поражения объектов молнией в естественных условиях, широкое распространение находит математическое и физическое моделирование данных процессов. Однако описанные в литературе результаты физического моделирования имеют ряд ограничений, не позволяющих применять их ко всему спектру молний, несущих к земле потенциалы различных уровней. Так, в модельных экспериментах по определению зон защиты молниеотводов [3] расположение высоковольтного электрода (имитирующего лидерный канал молнии) и заземленного электрода (имитирующего молниеотвод) постоянно и определяется, например, соотношением $h/H = 20$, где h — высота молниеотвода; H — расстояние от высоковольтного электрода до земли (аналог высоты ориентировки молнии). В то же время, согласно современным теориям [4,5], высота ориентировки лидера молнии определяется в основном его потенциалом U_i , поскольку длина последней ступени распространения лидерного канала L_S пропорциональна U_i и зависит от h , лишь когда уровни h и L_S близки. Причем опыты на моделях

по определению зон защиты молниеотводов проводились при неизменном расстоянии в азимутальном направлении между высоковольтным электродом, имитирующим лидерный канал молнии, и защищаемым объектом. Такой подход не позволяет учесть наличие молний со сравнительно небольшим потенциалом, имеющих малые значения L_S , которые могут приблизиться к объекту с небольшой высоты. Лидерные каналы данных молний при приближении к зоне защиты сбоку могут просто „не заметить“ молниеотвод и ударить мимо него в зону декларируемой защиты.

Существующие математические модели процессов распространения лидера молнии, как правило, либо не описывают процессы попадания молнии в наземные объекты [6], либо носят преимущественно качественный характер [7–9].

Наиболее приближенными к практике представляются модели, основанные на электрогеометрическом методе, положенном в основу стандарта МЭК [10]. Как отмечается в [11], данный метод предполагает наличие функциональной зависимости между дистанцией поражения R и током молнии в 1-м компоненте I_i — $R(I_i)$. Однако при этом не учитывается ряд особенностей, присущих процессу продвижения лидера молнии, в частности, влияние распределения электрического поля на направление и скорость продвижения лидера молнии. Функциональная зависимость $R(I_i)$, косвенно связывающая ток молнии и потенциал ее лидерного канала, существенно отличается от таковой, приведенной [5, с.185]. Причем, как отмечается в [5, с.217], для экспериментального определения зависимости $R(I_i)$ нет фактических данных, а теоретические оценки различных авторов отличаются в несколько раз.

Данная статья посвящена разработке методики, позволяющей рассчитать вероятность поражения молний защищаемых объектов, а также их отдельных зон (для объектов большой площади, например, высоковольтных подстанций) с учетом вероятности появления молний

как с наименьшим, так и с наибольшим потенциалом. Разработанная методика основана на модели развития лидерного канала молнии при ориентировке его на наземные объекты, описанной в [12]. Суть данной модели заключается в том, что процесс ориентировки лидера молнии полагается начавшимся, когда его стримерная зона касается земли, заземленного объекта или молниеотвода. В данной модели полагается, что удар молнии произойдет в зону, которую первой достигнет один из конкурирующих искровых каналов, развивающихся в стримерной зоне от лидерного канала молнии во всех возможных направлениях к заземленным участкам, подсоединение к которым обеспечивает образование гальванически замкнутой цепи. При этом учитываются процессы нелинейного изменения сопротивления искры по мере роста лидерного канала, сопротивление растеканию заземления, а также зависимость ускорения движения головки лидера от напряженности электрического поля.

Алгоритм расчета вероятности пробоя

При определении вероятности поражения молнией будем использовать N — прогнозируемое для данной географической области число прямых ударов молнии за год в объект площади S_0 [13]:

$$N \approx N_m S_0,$$

где $N_m = n_1 n_2$ — среднее количество ударов молнии в год на 1 km^2 в данной географической зоне; n_1 — число грозových часов в году; $n_2 \approx 0.1$ — среднее удельное число ударов в течение одного грозového часа на площади в 1 km^2 ; S_0 — площадь объекта.

Данную формулу можно трактовать так, что для данной географической местности вероятность поражения молнией исследуемого объекта определяется площадью над ним, с которой может произойти прорыв молнии. Тогда для исследуемой защищаемой зоны молниеотвода с помощью модели [12] рассчитаем размеры области S_i , с которой в нее может произойти прорыв молнии определенной амплитуды I_i . Зная P_i — вероятность появления молнии с током, меньшим I_i (см., например, [4]), и просуммировав все N_{ij} ударов молнии с амплитудой I_i , лидеры которых могут возникнуть на площади ΔS_j , получим выражение для прогнозируемого числа ударов молнии в исследуемую область в течение года

$$N_0 = N_m \sum_i^M \sum_j^K \Delta S_j (P_{i+1} - P_i) N_{ij}, \quad (1)$$

где ΔS_j — площадь одной из K элементарных площадок, на которые разбита исследуемая область; M — число интервалов, на которые разбит диапазон возможного

изменения тока молнии, причем $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$;

$$N_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если молния с амплитудой тока} \\ & I_{i+1} \leq I \leq I_i \text{ ударила в площадку } \Delta S_j, \\ 0, & \text{если не ударила.} \end{cases}$$

Для расположенной в той же местности зоны, площадь которой совпадает с площадью исследуемой области S_0 , количество прогнозируемых ударов молнии N_b определяется в соответствии с [13]: $N_b = N_m S_0$. Если использовать эту величину как базовую, можно определить, какова относительная вероятность попадания молнии в исследуемый объект

$$P^* = \frac{N_0}{N_b} = \frac{1}{S_0} \sum_i^M (P_{i+1} - P_i) \sum_j^K \Delta S_j N_{ij}. \quad (2)$$

Данное значение может быть как больше, так и меньше единицы. Оно показывает, какова вероятность поражения молнией исследуемой области по отношению к средней для данной местности. Для молниеотвода $P^* \gg 1$, так как он притягивает к себе молнии со значительной площади, откуда могут распространяться лидеры молний с различными уровнями потенциала. Вообще $P^* > 1$ и для любых объектов, выступающих над поверхностью земли, поскольку вероятность поражения их молнией повышена. Однако для объектов, расположенных в зоне защитного действия молниеотводов, $P^* < 1$, а для зоны, непосредственно прилегающей к основанию молниеотвода, $P^* = 0$. Зная P^* , можно найти прогнозируемое среднегодовое количество ударов молнии в интересующий объект при его расположении в определенной географической зоне: $N_0 = P^* N_m S_0$ и оценить риск попадания в него молнии в соответствии с [2].

В [12] была выдвинута гипотеза о том, что процесс ориентировки молнии на наземные объекты начинается в момент касания его стримерной зоны заземленного объекта или поверхности земли. Учитывая, что проводимости стримерной зоны и зоны коронного разряда близки (см., например, [5]), можно предположить, что такая ориентировка начинается в момент касания стримерной зоны лидера молнии встречного лидера, распространяющегося от наземного заземленного объекта, или области его коронного разряда. С учетом данного фактора прогнозируемая величина относительной вероятности поражения молнией исследуемого объекта может увеличиться. Однако учет данной особенности требует дополнительной экспериментальной проверки степени его влияния на процесс ориентировки лидера молнии.

Пример использования предложенного подхода для оценки вероятности поражения молнией заземленных объектов

Используя предложенный подход, оценим вероятность удара молнии в объекты, расположенные вблизи стержневого молниеотвода, зона защиты которого определяется, например, в соответствии с [1]. Для отрицательных молний с напряженностью, необходимой для продвижения лидера $E_i^- = 10 \text{ kV/cm}$ [5], длина ступеней лидера, в том числе последней, равна: $L_S = U_i/E_i^-$. Как видно из рис. 1, для объекта 1, расположенного на границе зоны (4) защиты молниеотвода 2 из-за наличия зоны 3, при движении с которой по направлению к земле лидеры молний сравнительно небольших напряжений могут ударить в него, P^* объекта 1 может быть больше единицы. Хотя данная величина существенно меньше, чем при отсутствии 2, тем не менее вероятность поражения объекта отлична от нуля.

Исходя из выдвинутой в [12] гипотезы об ориентировке лидера на наземный объект при касании его стримерной зоной, а также учитывая, что вследствие малых диаметров поперечных сечений как лидера молнии, так и молниеотвода, в начале процесса ориентировки (когда они расположены на большом расстоянии друг от друга) взаимного влияния их электрических полей не происходит, лидеры молний с длиной стримерной зоны L_S , меньшей чем высота молниеотвода, расстояние которых до молниеотвода по горизонтали превышает L_S , просто „не заметят“ его присутствия и будут ориентированы либо на землю, либо на расположенные в зоне касания стримерной зоны наземные объекты. Таким образом, в том случае, когда высота молниеотвода превышает минимальную длину стримерной зоны, часть области, которую принято считать защищенной, таковой уже не является, по крайней мере, для молний со сравнительно небольшими потенциалами.

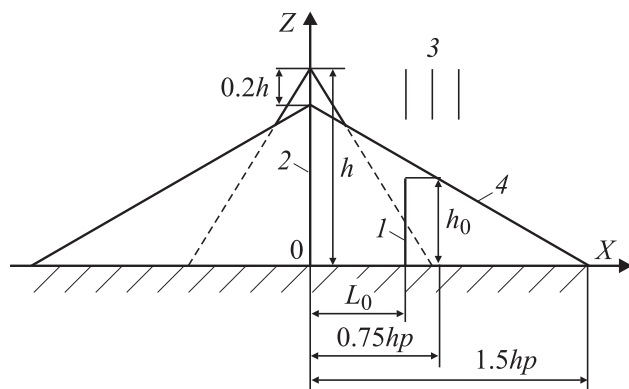


Рис. 1. Декларируемая в [1] область защиты молниеотвода со степенью надежности 0.95; $p = 1$ при $h \leq 30 \text{ m}$, $p < 1$ при $h > 30 \text{ m}$.

Не следует забывать также о наличии молний положительной полярности, перехват которых представляет еще большие трудности, поскольку для них напряженность поля, необходимая для продвижения лидера молнии, в 2 раза меньше, чем для отрицательных молний: $E_i^+ = 5 \text{ kV/cm}$ [5]. Таким образом, минимальная длина стримерной зоны уменьшается в 2 раза. Для точного учета всех возможных факторов при расчете вероятности поражения защищаемых объектов, в особенности повышенной опасности (нефтепроводы, газопроводы, атомные электростанции, пусковые ракетные комплексы), необходимо принимать во внимание также возможность удара молний положительной полярности, вероятность появления которых зависит от широты, на которой расположен исследуемый объект [14].

Рассчитаем прогнозируемое количество ударов молнии в молниеотвод. Для этого разобьем область изменения вероятности появления отрицательных молний, ток которых лежит в интервале $(I_{i+1} - I_i)$, на 21 часть. В таблице приведены интервалы разбиения области изменения токов молнии, а также соответствующие им вероятности появления молний с такими токами и величины потенциалов, выносимых ими к земле (при этом были использованы данные [5] и [10]). Функциональная связь потенциала лидера молнии (который в настоящее время невозможно измерить) и тока молнии (который измеряется) определяется в соответствии с [5, с. 172, 185] как

$$U_i \sim (500/0.6) I_i \approx 800 I_i. \quad (3)$$

В таблице приведены также значения потенциалов лидерного канала молнии, определенные исходя из зависимости, установленной в [10] между дистанцией поражения R и током молнии в 1-м компоненте I_i : $R = 9.4 I_i^{2/3} (R, \text{m}; I_i, \text{kA})$, тогда

$$U_i = E_i^- R = 1.0 \cdot 9.4 I_i^{2/3} = 9.4 I_i^{2/3} \text{ MV}. \quad (4)$$

С помощью разработанного программного обеспечения, основанного на модели, описывающей процесс ориентировки лидерного канала молнии на наземные объекты [12], рассчитаем радиусы зон перехвата молниеотводом высотой 10 m молний с определенным уровнем потенциала (см. таблицу), используя зависимость вида (3) между током молнии и потенциалом ее лидера. Сначала рассмотрим случай отсутствия объектов в зоне защиты молниеотвода. В данных расчетах полагалось, что лидер молнии с потенциалом U_i начинает ориентировку на наземный объект, когда расстояние между его головкой и вершиной объекта равно длине последней ступени распространения лидерного канала L_S , при этом расстояние между осями лидера и молниеотвода равняется R_S . Расчетным путем для данного U_i определяется максимальная величина R_S , при которой молниеотвод еще перехватывает лидер молнии. Будем полагать, что в зоне $R < R_S$ не все молнии будут перехватываться молниеотводом. Для каждого интервала изменения U_i площадь,

№ n/n	I_i, kA	$P_{i+1} - P_i$	ΔP_i	U_i, MV [5]	$U_i = 9.4 \cdot I_i^{2/3}, \text{MV}$ [10]
1	2–3	1–0.99	0.01	2	15
2	3–4	0.99–0.98	0.01	3	20
3	4–5	0.98–0.97	0.01	4	25
4	5–6	0.97–0.96	0.01	4.5	30
5	6–7	0.96–0.95	0.01	5	32
6	7–8	0.95–0.93	0.02	6	36
7	8–9	0.93–0.92	0.01	7	40
8	9–10	0.92–0.91	0.01	7.5	42
9	10–12	0.91–0.89	0.02	9	44
10	12–15	0.89–0.85	0.04	11	50
11	15–20	0.85–0.79	0.06	14	60
12	20–25	0.79–0.72	0.07	18	70
13	25–30	0.72–0.57	0.15	22	80
14	30–40	0.57–0.37	0.2	28	100
15	40–50	0.37–0.25	0.12	36	120
16	50–60	0.25–0.15	0.1	44	140
17	60–70	0.15–0.08	0.07	52	150
18	70–80	0.08–0.05	0.03	60	170
19	80–90	0.05–0.03	0.02	70	180
20	90–100	0.03–0.02	0.01	75	200
21	100–150	0.02–0.000	0.02	100	230

с которой может произойти удар молнии, равняется $S_i = \pi R_i^2$. Будем полагать, что молнии, несущие к земле потенциал U_{1i} и распространяющиеся с площади S_i , с равной вероятностью будут перехвачены молниеотводом. При этом может произойти $N = N_m S_i (P_{i+1} - P_i)$ ударов молний с потенциалом U_{1i} .

Тогда, пользуясь известной зависимостью для вероятности появления токов молнии, больших определенной амплитуды $P_i(I_i)$ (см. таблицу), основанную на данных [4], запишем в соответствии с (1) прогнозируемое число ударов в молниеотвод

$$N_{02} = N_m \pi \sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) R_i^2,$$

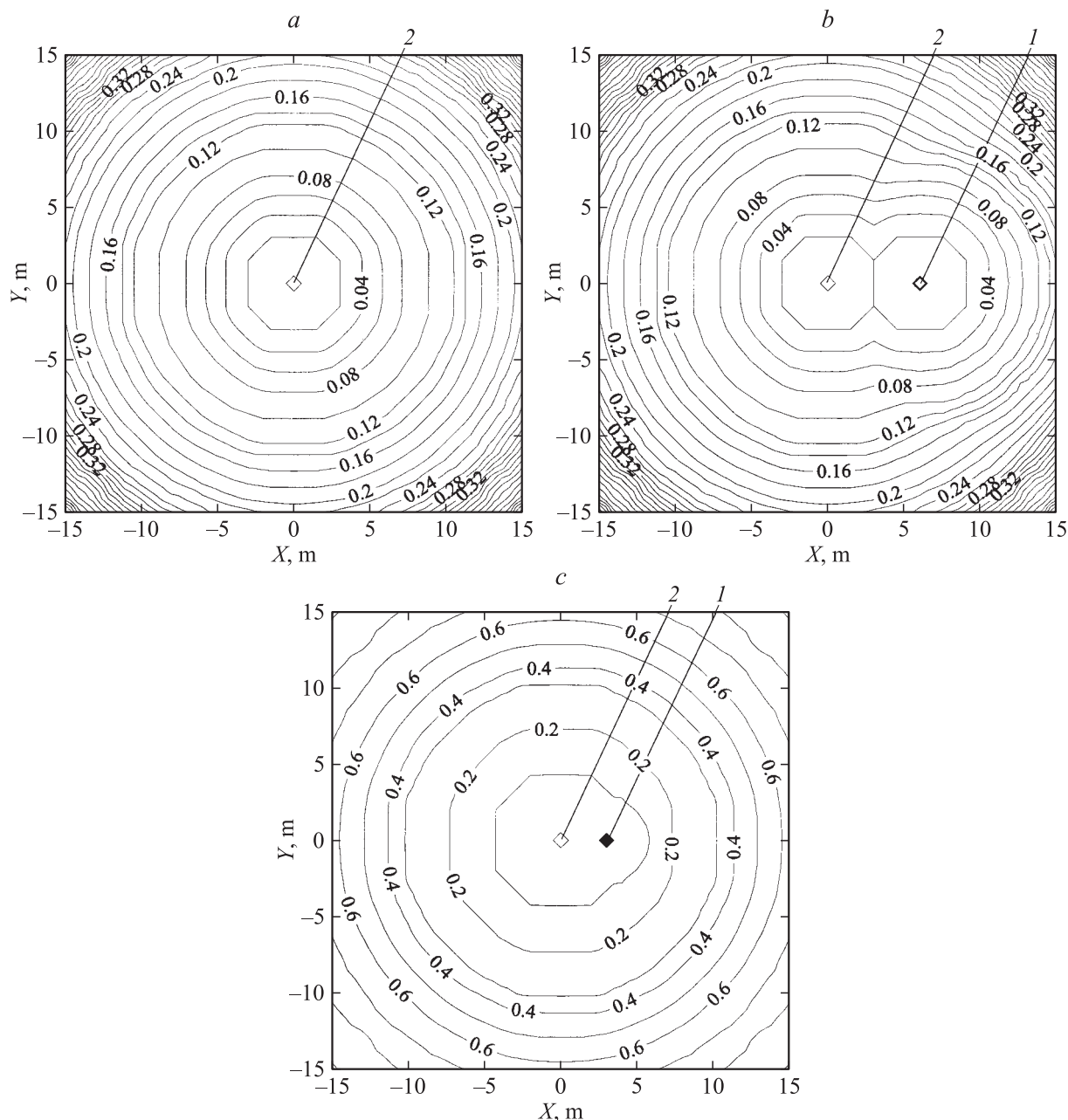
где $M = 21$.

При $h = 20 \text{ m}$ рассчитанное значение N_{02} для молний отрицательной полярности составляет $0.2626 \cdot 10^{-2}$; при 10 — $N_{02} = 0.1572 \cdot 10^{-2}$; при 7 — $N_{02} = 0.1150 \cdot 10^{-2} N_m$.

Рассчитаем по формуле (1) относительную вероятность поражения молнией отрицательной полярности стержневого объекта I высотой $h_0 = 4.5 \text{ m}$, находящегося на расстоянии $L_0 = 6 \text{ m}$ от стержневого молниеотвода 2 высотой $h = 10 \text{ m}$ (рис. 1). Такой объект находится внутри декларируемой в [1] зоны защиты молниеотвода. При этом было использовано разработанное программное обеспечение, основанное на модели ориентирования лидера молнии [12]. Расчеты проводились при разбиении области изменения токов молнии, приведенном в таблице, U_i определялось по формуле (3) [5]. В результате рассчитанное значение прогнозируемого числа ударов молнии в I в год при наличии молниеотвода:

$N_{01} = 0.18 \cdot 10^{-4} N_m$, значение N_{01} для случая отсутствия молниеотвода: $N_{01} = 0.762 \cdot 10^{-3} N_m$. Таким образом, в результате наличия 2 вероятность поражения молний объекта I снизилась в 42 раза, однако уменьшить вероятность поражения его молнией ниже среднего уровня для данной местности, как можно было бы ожидать для объекта в защитной зоне молниеотвода, определяемой в соответствии с [1], не удалось (площадь основания стержневых объектов и молниеотводов составляет порядка $S_0 \approx 10^{-8} \text{ km}^2$, значит, в рассматриваемой местности прогнозируемое число ударов в год в такую площадь $N_b = N_m S_0 \approx 10^{-8} N_m$).

На рис. 2 представлены рассчитанные линии $P^* = \text{const}$, показывающие степень снижения количества ударов молний в отдельные участки декларируемой в [1] зоны защиты молниеотвода по отношению к среднему прогнозируемому числу ударов в год для данной местности. Рис. 2, а соответствует расчету при отсутствии объектов в зоне защиты молниеотвода высотой 10 m, а рис. 2, б — при наличии объекта I (рис. 1). Для молниеотвода высотой $h = 20 \text{ m}$ рассчитанные значения $P^* = \text{const}$ при наличии I показаны на рис. 2, с. При $h = 20 \text{ m}$ прогнозируемое число ударов в молниеотвод и данный объект — $N_{02} = 0.2626 \cdot 10^{-2} N_m$, $N_{01} = 0.1 \cdot 10^{-4} N_m$. Таким образом, по сравнению с молниеотводом высотой 10 m, для молниеотвода высотой 20 m общее прогнозируемое число ударов в защищаемый объект снижается почти в 2, а соотношение „число ударов в объект–число ударов в молниеотвод“ — более чем в 3 раза. Для молниеотводов высотой $h = 7 \text{ m}$ рассматриваемый объект выходит за пределы декларируемой зоны защиты, при этом рассчитанное

Рис. 2. Линии $P^* = \text{const}$.

прогнозируемое число ударов в него и молниеотвод: $N_{01} = 0.112 \cdot 10^{-3} N_m$, $N_{02} = 0.1086 \cdot 10^{-2} N_m$.

Рассчитаем относительную вероятность поражения защищаемой зоны молниеотвода в отсутствие объектов в зоне защиты (см. рис. 1 [1]). Для этого поступим, как и в экспериментальных исследованиях, отнеся количество попаданий молнии в молниеотвод к полному числу ударов в молниеотвод и защищаемую зону. Рассчитанная таким образом относительная вероятность поражения молнией зоны защиты молниеотвода 2, показанной на рис. 1 ($R < 1.5h$, $h = 10$ м), $P^* = 0.946$, а зоны $R < h$ — $P^* = 0.986$, т.е. вероятности, полученные расчетным путем, практически совпадают с вероятностями поражения

данных зон, указанными в [1] (0.95 и 0.99 соответственно). Иначе обстоит дело в случае молниеотвода высотой $h = 20$ м, для него относительная вероятность поражения молнией зоны защиты $R < 1.5h$: $P^* = 0.724$, а зоны $R < h$ — $P^* = 0.92$, т.е. меньше, чем указано в [1]. Для молниеотвода же высотой $h = 7$ м относительная вероятность поражения молнией зоны защиты молниеотвода $R < 1.5h$: $P^* = 0.98$, а зоны $R < h$ — $P^* = 0.994$.

Аналогичные расчеты для случая отсутствия объектов в зоне защиты молниеотвода высотой $h = 10$ м были проведены также с использованием зависимости между потенциалом лидера молнии и ее разрядным

током, определяемой выражением (4) в соответствии с данными [10] (см. таблицу). Согласно этим расчетам, прогнозируемое число ударов в молниеотвод за год в данной местности составляет $N_{02} = 0.5727 \cdot 10^{-2} N_m$, число ударов в зону $R < 1.5$ — $N_{01} = 0.1 \cdot 10^{-6} N_m$, а в зону $R < h$ молния вообще не попадает. Поскольку эти данные расходятся с наблюдаемыми на практике, можно сделать вывод, что зависимость (4) не отражает действительной связи между потенциалом лидера молнии и ее разрядным током и не может быть использована в предложенной методике для оценки вероятности поражения объектов молнией.

Можно выдвинуть гипотезу о том, что на больших защищаемых территориях (например, нефтехранилищах, высоковольтных подстанциях) помимо использования высоких ($h > 20$ м) молниеотводов для защиты от молний предельно больших потенциалов, целесообразна дополнительная локальная защита отдельных особо важных подобъектов одним или несколькими (в зависимости от площади) невысокими молниеотводами ($h \leq 3-5$ м). Высокие молниеотводы существенно увеличивают вероятность удара в них молний, так как они притягивают молнии повышенных напряжений ($U_i > 80$ кВ) с окружающей территории, существенно большей, чем декларируемая зона защиты. Подобные, более частые, разряды молний повышенных напряжений, пусть даже в молниеотвод, являются нежелательным явлением для электроэнергетических объектов, поскольку могут привести к пробоям грунта в окрестности заземлителей и появлению аварийных наводок на оборудование, содержащее чувствительную микроэлектронику.

Выводы

1. Предложена методика расчета вероятности поражения молнией отдельных частей защищаемых протяженных областей, которая основана на гипотезе, что процесс ориентировки лидера молнии на наземные объекты происходит в момент касания их стримерной зоной лидерного канала молнии. В данной методике учитывается вероятность появления молний с различным потенциалом лидерного канала, а также возможность поражения защищаемых объектов лидерами молний, движущимися из области, расположенной не только над декларируемой зоной защиты молниеотвода, но и вне нее.

2. Выполненный пример расчета вероятности поражения объекта, расположенного в декларируемой в [1] безопасной зоне молниеотвода высотой 10 м показал, что эта вероятность может быть выше, чем средняя для данной местности. Так, если прогнозируемое за год число ударов молнии в той же зоне вблизи молниеотвода, но без объекта, составляет $0.06 S_0 N_m$, то хотя число поражений данного объекта существенно снижается по отношению к случаю отсутствия молниеотвода (в рас-

считываемом примере в 42 раза), оно все же гораздо выше, чем среднее прогнозируемое число ударов молнии в данной местности (для рассматриваемого примера более чем в 18 раз).

3. Для повышения надежности молниезащиты особо опасных с точки зрения техногенных катастроф объектов можно порекомендовать использовать один высокий молниеотвод ($h > 20$ м) для защиты от молний повышенного потенциала ($U_i \sim 80-200$ кВ), а по периметру зоны с $R \sim h$ или вблизи расположенных в этой зоне объектов, поражение которых особенно опасно, разместить невысокие молниеотводы ($h \sim 3-5$ м) для перехвата молний, несущих к земле сравнительно небольшой потенциал ($U_i < 10$ кВ).

Список литературы

- [1] РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [2] Assessment of the risk of damage due to lightning // Technical report IEC 1662. Geneva, 1995. 109 p.
- [3] Электрофизические основы техники высоких напряжений / Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1993. 541 с.
- [4] IEC 1312-1. International standard „Protection against lightning electromagnetic impulse“. Geneva: IEC. 1995. 81 p.
- [5] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
- [6] Mansell E., MacGorman D., Ziegler C., Straka J. // J. of Geophys. Res. 2002. Vol. 107. N D9.
- [7] Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 48–53.
- [8] Petrov N.I., Petrova G.N., D'Alessandro F. // IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Ins. 2003. V. 10. Iss. 4. P. 641–654.
- [9] Agoris D.P., Charalambakos V.P., Pyrgioty E., Grzybowski S. // 26th Int. Conf. on Lightning Protection. Cracow (Poland), 2002. P. 270–274.
- [10] The International Standard IEC 1024-1. Protection of structures. Part I: General Principles. 1990.
- [11] Ларионов В.П. Основы молниезащиты. М.: Знак, 1999. 103 с.
- [12] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 44–51.
- [13] Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. М.: Высш. шк., 1973. 527 с.
- [14] Юман М. Молния. М.: Мир. 1972. 327 с.